

Projet SYSTEM-ECO⁴ : Evaluation de systèmes de grandes cultures à faible usage de pesticides

Munier-Jolain N.¹, Abgrall M.¹, Adeux G.^{1,5}, Alletto L.², Bonnet C.³, Cordeau S.¹, Darras S.⁴, Deswarte C.⁵, Farcy P.¹, Gavaland A.³, Justes E.^{3,8}, Giuliano S.⁵, Meunier D.¹, Pernel J.⁶, Raffailac D.³, Gleizes B.³, Tison G.³, Ubertosì M.⁷

¹ INRA - UMR 1347 Agroécologie & UE 115 Domaine d'Epoisses, 17 rue Sully, BP 86510, F-21065 Dijon cedex

² Chambre Régionale d'Agriculture d'Occitanie, BP 22107, F-31321 Castanet Tolosan cedex

³ INRA - UMR 1248 AGIR, 24 Chemin de Borde Rouge – Auzeville, CS 52627, F-31326 Castanet Tolosan cedex

⁴ INRA, UE GCIE – Picardie, 2 Chaussée Brunehaut - Estrées-Mons, CS 50136, F-80203 Péronne cedex

⁵ INP-PURPAN, route Lamasquère, F-31600 Seysses

⁶ Agro-Transfert Ressources et Territoires, 2, Chaussée de Brunehaut, F-80200 Estrées-Mons

⁷ AgroSup-Dijon, 26, Bd Dr Petitjean, BP 87999, F-21079 Dijon cedex

⁸ CIRAD, UMR SYSTEM, 2 place Viala, F-34060 Montpellier

Correspondance : nicolas.munier-jolain@inra.fr

Résumé

19 prototypes de systèmes de culture ont été testés sur quatre sites contrastés (Picardie, Bourgogne et deux sites dans la région de Toulouse). Ces systèmes de grandes cultures ont été conçus selon les principes de Protection Intégrée pour limiter l'usage des pesticides en général et des herbicides en particulier. Les combinaisons de leviers alternatifs ont permis de gérer durablement la flore adventice avec peu d'herbicides, et de baisser l'usage de l'ensemble des pesticides. Certains systèmes permettent de concilier faible IFT et bonne performance économique. Trois sites ont été instrumentés pour collecter des eaux de drainage et mesurer les transferts de substances actives. Ces dispositifs ont permis d'établir un lien entre les IFT cumulés et les quantités de substance transférées dans les eaux, à l'échelle d'un site et sur trois années de mesure, confirmant ainsi le lien entre l'usage de pesticides et leur impact. Les prototypes fondés sur le semis direct ont été décevants : ils ont nécessité beaucoup d'herbicides pour maîtriser les adventices, les quantités de substances actives transférées sous ces parcelles ont été importantes, et les performances économiques ont été moyennes.

Mots-clés : Système de culture, Adventices, Protection intégrée, Multiperformance, Lysimètre

Abstract: The SYSTEM-ECO⁴ project: Evaluation of arable cropping systems with low pesticide input

19 'low pesticide input' arable cropping systems were tested on four experimental sites, from northern to southern France. Cropping systems were designed according to the Integrated Pest Management principles with the aim of reducing pesticide reliance, with a special focus on herbicides and weed management. Combinations of several non-chemical management measures provided long term weed control with little amounts of herbicides, and made it possible to decrease significantly all pesticide inputs. Some of the systems tested were also associated with a satisfying economic profitability. Three sites were equipped so as to collect percolating water at a depth of one meter in the soil, and to measure active ingredient transfers toward ground water. For a given site and over the three years of successive measurement, results showed a clear link between the cumulated treatment frequency index and the amount of pesticides transferred, hence confirming the link between pesticide use and pesticide

impact. Cropping systems prototypes based on direct drilling were underwhelming: they required high amounts of herbicides to control weeds, high quantities of residues were collected below ground, and economic performances were rather poor.

Keywords: Weeds, Integrated Pest Management, Cropping system, Assessment

Introduction : contexte et enjeux

Le plan ECOPHYTO vise une réduction drastique de l'usage de produits phytosanitaires agricoles. L'hypothèse sous-jacente est que réduire l'usage est le meilleur moyen de réduire les contaminations de l'environnement (eau, air, sol) par des résidus de pesticides, et donc de réduire les impacts sur la santé humaine, sur la qualité de l'environnement et sur la biodiversité. Cependant, ces produits étant utilisés pour maîtriser des bioagresseurs susceptibles de provoquer des dégâts sur les cultures, réduire le recours aux pesticides pourrait impacter la productivité et la rentabilité des systèmes agricoles. Par ailleurs, les leviers de gestion de ces bioagresseurs alternatifs aux pesticides ont potentiellement des impacts économiques, voire environnementaux, qu'il faut évaluer précisément pour prévoir les conséquences à grande échelle que pourraient avoir l'adoption généralisée de systèmes agricoles peu consommateurs de pesticides.

Le projet SYSTEM-ECO⁴ a permis de conduire et d'évaluer 19 prototypes de systèmes de grandes cultures, conçus pour limiter de façon drastique le recours aux produits phytosanitaires, sur quatre sites contrastés :

- Dijon-Epoisses, en Bourgogne, sur le Domaine expérimental de l'INRA ;
- Estrées-Mons, en Picardie, sur le Domaine expérimental de l'INRA, sur un dispositif piloté conjointement avec Agro-Transfert Ressources et Territoires ;
- Toulouse-Auzeville, en Occitanie, sur le Domaine expérimental de l'INRA ;
- Toulouse-Lamothe, en Occitanie, sur la ferme de l'Ecole d'Ingénieurs de Purpan.

Les sites ont rejoint le réseau DEPHY-EXPE en 2012, avec les spécificités suivantes :

- La majorité des systèmes de culture testés préexistaient avant la constitution du réseau DEPHY-EXPE. Le dispositif de Picardie a été spécifiquement mis en place à l'occasion du projet et les systèmes de culture de Toulouse-Lamothe ont fait l'objet d'une phase de reconception lors de l'entrée dans le réseau. Sur ce dispositif, le système de culture « Monoculture 'Semis direct compost' (S5) » a été introduit en cours de projet (en 2014) pour tenter d'apporter plus rapidement des éléments de compréhension aux effets de l'accumulation des matières organiques en surface du sol sur le devenir environnemental des pesticides.
- Les systèmes ont été conçus pour la plupart avec l'objectif de réduire drastiquement l'usage des produits phytosanitaires (objectif le plus souvent compris entre -50 et -80%), avec un focus particulier sur la gestion de la flore adventice et la réduction des herbicides, souvent identifiées comme un verrou technique du plan ECOPHYTO en grandes cultures.
- Les parcelles des deux sites de Toulouse et du site de Dijon sont instrumentées pour recueillir les eaux de percolation à environ 1 mètre de profondeur, ce qui permet de mesurer les pertes de résidus de pesticides entraînés dans ces eaux de percolation, afin d'étudier le lien entre le niveau d'usage de pesticides et les impacts sur la qualité de l'eau. Par ailleurs, ces données ont permis de calibrer et d'évaluer des modèles de transfert de pesticides dans le cadre des projets ECOPEST et PERFORM, pilotés par Laure Mamy (UMR ECOSYS à Grignon). Ces modèles sont des outils utiles pour évaluer l'effet des pratiques agricoles sur la qualité des eaux (Lammoglia et al., 2017).

L'évaluation des systèmes de culture porte évidemment sur le niveau d'utilisation des pesticides, en particulier des herbicides, et la quantité de résidus de pesticides transférés vers l'environnement dans les eaux de percolation, mais aussi sur la maîtrise des bioagresseurs, en particulier des adventices, et sur les performances économiques. La dimension systémique de l'expérimentation est importante pour plusieurs raisons. D'une part, comme il n'existe pas en grandes cultures de technique de désherbage curatif aussi efficace que le désherbage chimique, la maîtrise de la flore adventice nécessite la combinaison de nombreux leviers de gestion « à effet partiel », qu'il faut organiser dans des systèmes de culture cohérents. Certains leviers intégrés, comme la diversification de la rotation, peuvent bouleverser les systèmes et affecter de façon importante leurs performances. D'autre part, l'évaluation de la maîtrise de la flore adventice nécessite de considérer des temps longs, en raison de la persistance des semences dans le sol et des effets cumulatifs des choix techniques sur la dynamique des communautés adventices sur les années successives. Le critère d'évaluation de la maîtrise de la flore adventice est moins la densité de plantes adventices observées à un moment donné que l'évolution des densités et des biomasses année après année.

Tableau 1 : Caractéristiques des quatre sites expérimentaux

	Dijon-Epoisses	Estrées-Mons	Toulouse-Auzeville	Toulouse-Lamothe
Climat	Climat continental. Pluviométrie moy. de 760 mm/an. Printemps secs.	Climat océanique à semi-continental. Pluviométrie moy. de 650 mm/an.	Climat océanique dégradé sous influence méditerranéenne à hiver assez froid, printemps frais et pluvieux et été chaud et sec. Pluviométrie moy. de 635 mm/an.	
Sol	Argilo-calcaire prof. 60-90 cm, plastique en hiver, compact en été, sensible à la fragmentation par gel-dégel. Fentes de retrait en été.	Limons moyen profond (10 m).	Argilo-limoneux très compact avec de fortes fentes en été.	Limono-argileux à argilo-limoneux Prof. 120-150 cm. Hydromorphe, fortes fentes de retrait en été. Structure fragile
Système de référence	Colza-Blé-Orge H Labour 2 ans sur 3	1-Colza-Blé-Orge H Travail du sol sans labour 2- Betterave-Blé-Colza-Blé Labour fréquent	Tournesol-Blé dur Labour tous les ans	Monoculture de Maïs Labour tous les ans Sol nu en hiver Désherbage chimique exclusif : post-semis/prélevée + rattrapage éventuel
Potentiel de rendement	Blé : 80-85 Qx/ha	Blé : 95 Qx/ha	Blé dur : 65 Qx/ha	Maïs irrigué : 130 Qx/ha
Flore adventice	Fort stock de printanières (renouées) et estivales (amarante, chénopode, morelle...). Vulpin, véroniques, gaillet	Fort stock d'automnales (matricaires, gaillet), mais aussi de printanières (renouées, chénopode).	En cultures d'hiver : Folle-avoine, pâturin, véronique En cultures d'été : panic, chénopode, mais aussi vivaces (liseron, chardon)	En maïs, renouées et graminées annuelles, mais aussi vivaces (liserons). Ray-grass et folle-avoine en cultures d'hiver.
Autres bioagresseurs	Limaces, charançons, cécidomyies. Aphanomyces sur pois	Septoriose, rouilles, pucerons, pigeons, corbeaux	Bruches, sitones, oiseaux	Sésamie, pyrale et fusariose sur maïs
Nombre de répétitions	2 répétitions « climatiques »*	2 répétitions « climatiques »	3 répétitions « climatiques »	2 répétitions spatiales, plus 3 répétitions climatiques
Surface des parcelles	1,5 – 2 ha	0,6 ha	0,3 ha	0,07-0,15 ha
Instrumentation 'transferts de pesticides'	Oui (1 rep seulement)	Non	Oui	Oui

* Les répétitions climatiques sont des répétitions du système de culture, considéré comme un corpus de principes de gestion et de règles de décision, sur plusieurs parcelles, avec un décalage entre parcelles dans la succession culturale.

Le projet multi-site se donnait comme ambition d'apporter des éléments de connaissances sur les questions suivantes :

- La combinaison de techniques à effets partiels permet-elle de maîtriser de façon durable des communautés adventices, tout en réduisant de façon significative l'intensité de désherbage chimique, conformément au plan ECOPHYTO ?
- La réduction des Indices de Fréquence de Traitement (IFT) contribue-t-elle à réduire les quantités de résidus de produits phytosanitaires dans l'environnement ? Trois des quatre sites expérimentaux ont été équipés de dispositifs de plaques lysimétriques disposées à 1 mètre de profondeur pour collecter les eaux de percolation pendant les périodes de drainage, afin de mesurer les concentrations en pesticides et les quantités transférées annuellement.
- La diversification de la succession culturale est-elle systématiquement et partout un levier indispensable pour gérer la flore adventice, et réduire la dépendance aux pesticides en général et aux herbicides en particulier ?
- Dans quelles mesures et sous quelles conditions les stratégies de semis direct sous couvert végétal peuvent-elle être une piste pour réduire les IFT ?

Tableau 2 : Systèmes de culture à faible usage de pesticides testés sur les quatre sites

Site	Système ECOPHYTO	Successions culturales	OBJECTIF Réduction d'IFT*
Dijon-Epoisses	Semis Direct Sous Couvert (S2)	Colza - Blé - Orge P - Soja - Triticale+Féverole	-30 %
	Protection Intégrée sans désherbage mécanique (S3)	Colza - Triticale - Soja - Blé - Orge P - Triticale+Féverole	-50 %
	Protection Intégrée avec désherbage mécanique (S4)	Colza - Blé - Soja - Orge P - Triticale+Féverole	-50 %
	Zéro herbicide (S5)	Colza - Triticale - Orge P - Tournesol - Blé - Luzerne	-80 %
Estrées-Mons	SCOP Ecophyto1	Colza - Maïs - Blé - Pois P - Blé - Orge P	-50 %
	SCOP Ecophyto2	Colza + légumineuse - Blé + trèfle - Maïs - Blé - Lin P - Orge P + Pois P	-70 %
	Betteravier Ecophyto1	Betterave - Blé - Pois P - Colza - Orge P - Blé	-50 %
	Betteravier Ecophyto2	Betterave - Blé - Colza - Luzerne - Luzerne - Blé	-70 %
Toulouse-Auzeville	Rotation Bas Intrants (BI)	Sorgho - Tournesol - Blé dur	-50 %
	Rotation BI – avec CI		-50 %
	Rotation Très Bas Intrants (TBI)	Tournesol - Féverole H - Blé dur	-80 %
	Rotation (TBI) – avec CI		-80 %
	Rotation Agroécologie	Tournesol+Soja - Blé dur+Pois - Blé tendre+Féverole	-100 %
	Rotation Agroécologie - avec CI		-100 %
Toulouse-Lamothe	Rotation Courte (S2)	Maïs - Soja - Blé tendre	-70 %
	Monoculture 'ECOPHYTO' (S3)	Maïs	-50 %
	Monoculture 'Semis direct' (S4)	Maïs	-10 %
	Monoculture 'Semis direct compost' (S5)	Maïs	-10 %
	Monoculture 'Strip Till' (S6)	Maïs	-10 %

* L'objectif de réduction d'IFT est exprimé en % par rapport au système local de référence

1. Prototypes de systèmes de culture et leviers techniques mobilisés

Les systèmes de culture de référence sont construits sur chaque site sur la base d'une succession culturale typique de la région (Tableau 1), un régime de travail du sol également classique, et des stratégies de gestion des bioagresseurs majoritairement fondées sur la lutte chimique. Les 19 prototypes testés sont largement construits sur la base de principes partagés de gestion de la flore adventice. Cependant ils se différencient par des options stratégiques différentes et/ou des combinaisons différentes de leviers techniques (Tableau 2) :

- **Diversification de la rotation et diversification des périodes de semis**, pour éviter la multiplication tous les ans des espèces au cycle biologique très saisonnier. Cette diversification par rapport au système local de référence est un levier partagé par tous les systèmes testés, sauf par quatre systèmes du site de Toulouse-Lamothé, où sont testées des variantes de monoculture de maïs misant sur d'autres leviers stratégiques (désherbage mécanique, semis direct et strip-till) pour baisser la dépendance aux pesticides (Tableau 2). La diversification va jusqu'à intégrer plusieurs années de luzerne en prairie temporaire dans le système sans herbicide de Dijon-Epoisses, et dans le système betteravier à très forte ambition de réduction des pesticides à Estrées-Mons.
- **Labour**, contribuant à enfouir les graines d'adventices à une profondeur suffisante pour éviter la germination. Il est mobilisé ponctuellement dans la plupart des systèmes prototypes, sauf dans les stratégies explicitement en semis direct (ou strip-till), et dans les systèmes « céréaliers » de Estrées-Mons. Quand il est mobilisé dans des rotations diversifiées, il n'est pas systématique tous les ans, mais intervient typiquement une et une seule fois entre deux cultures d'hiver.
- **Faux-semis**, visant à maximiser les germinations de graines adventices pendant la période d'interculture pour réduire le potentiel de germination en culture. Ce levier est mobilisé systématiquement dans tous les systèmes, sauf à Toulouse-Lamothé et dans les stratégies de semis direct et de strip-till.
- **Semis-direct et strip-till**, visant à limiter la germination des adventices du fait de l'absence de travail du sol, et à maintenir un mulch en surface perturbant la croissance des plantules adventices. Un système à Dijon-Epoisses et trois systèmes à Toulouse-Lamothé explorent ce type de stratégie.
- **Retard des dates de semis des céréales**, pour esquiver les levées d'adventices d'automne (et réduire les pressions de maladies). Ce levier est mobilisé pour tous les systèmes « céréaliers ».
- **Choix variétal : variétés compétitives, à croissance initiale rapide, à cycle plus court**, voire mélanges de variétés, semées à forte densité pour accélérer la fermeture du couvert cultivé, sur les sites de Dijon-Epoisses, Toulouse-Auzeville et Toulouse-Lamothé.
- **Cultures en mélanges d'espèces**, pour maximiser la concurrence tout en limitant les risques de maladies : mélange Orge-Pois, Blé-Trèfle, Colza associé à une légumineuse à Estrées-Mons dans le système « céréalière » le plus innovant, mélange Triticale-Féverole, Blé dur-Pois, Tournesol-soja en « bandes alternées » dans le système agroécologique de Toulouse-Auzeville, Mélange Triticale-Féverole à Dijon-Epoisses.
- **Cultures intermédiaires pendant l'interculture**, limitant la croissance et la production de semences des adventices pendant cette période. Les couverts sont implantés dans toutes les intercultures longues de tous les systèmes, sauf à Dijon-Epoisses afin de maximiser le temps disponible pour réaliser des faux-semis pendant cette période¹. A Toulouse-Auzeville, les trois systèmes sont testés sous deux variantes, avec ou sans culture intermédiaire.

¹ Une dérogation a été demandée pour maintenir ce principe de gestion malgré la réglementation en zone vulnérable

- **Désherbage mécanique** (herse-étrille, houe rotative, binage dans les cultures à fort écartement), dans tous les prototypes, sauf les systèmes en semis direct et strip-till, où la présence de résidus abondants en surface ne le permet pas, et sauf dans un système de Dijon-Epoisses qui vise justement à évaluer le potentiel de réduction d'usage d'herbicides sans mobiliser ce levier de substitution.

2. Résultats

2.1 Réduction d'usage de pesticides (IFT)

2.1.1 Réduction des herbicides

17 des 19 prototypes testés ont permis de réduire de façon significative les IFT-Herbicides par rapport aux systèmes de référence locaux, de -48 à -75% à Toulouse-Auzeville, de -32 à -64% à Dijon-Epoisses (voire -100% évidemment dans le système sans herbicides), de -10 à -73% à Toulouse-Lamothe, et de -30 à -52% à Estrées-Mons (sur la période 2012-2016). A Estrées-Mons, cette baisse atteint -42 à -78% sur la période 2012-2018 intégrant toutes les cultures de la rotation, y compris la luzerne et le colza sur les systèmes betteraviers, deux cultures à faible usage d'herbicide (grâce au binage et désherbage chimique localisé sur le rang en colza). A Toulouse-Auzeville, la baisse des IFT-Herbicides est en tendance plus importante dans les systèmes sans couvert d'interculture, probablement grâce à une intensité de faux-semis plus importante. A Dijon, le désherbage mécanique qui différencie les systèmes S3 et S4 permet de gagner environ 0,4 points d'IFT-Herbicides. Les systèmes les moins consommateurs de pesticides sont respectivement le système 'agroécologie sans CI' à Toulouse-Auzeville, le système sans herbicides puis le système de Protection Intégrée avec désherbage mécanique à Dijon-Epoisses, la monoculture de maïs 'ECOPHYTO' avec désherbage mécanique à Toulouse-Lamothe, et le système betteravier avec luzerne à Estrées-Mons.

A l'inverse, deux systèmes n'ont pas du tout atteint les objectifs de réduction d'usage d'herbicides : (i) le système en semis direct sous couvert à Dijon-Epoisses, notamment parce que le glyphosate est utilisé de façon presque systématique avant semis pour détruire le couvert d'interculture ou les adventices qui s'y développent ; (ii) le système de semis direct en monoculture de maïs sans apport de matière organique à Toulouse-Lamothe, également du fait de la destruction quasi-systématique du couvert avec du glyphosate ainsi que par l'application de davantage d'herbicides de rattrapage (post-levée).

2.1.2 Réduction de l'ensemble des pesticides

Les IFT ont été calculés avec la méthode en vigueur au lancement du réseau DEPHY, sans tenir compte de la cible des traitements. La baisse des IFT-totaux (hors traitements de semences) est généralisée à presque tous les prototypes testés (Figure 1). Sur la période 2012-2016, elle varie de -34% à -69 % à Toulouse-Auzeville, de -28% à -79% à Dijon-Epoisses, de -23% à -76% à Toulouse-Lamothe, et de -41% à -59% à Estrées-Mons, toujours par rapport au système local de référence (-61 à -75% à Estrées-Mons sur la période 2012-2018). Les objectifs initiaux de réduction les plus ambitieux (-70%, -80%) ne sont en général pas atteints, sauf à Estrées-Mons sur le système betteravier, et à Dijon avec la réduction de -79% dans le système 'zéro herbicide', mais les objectifs déjà très ambitieux de -50% sont le plus souvent atteints, voire dépassés à Toulouse-Auzeville dans le système 'Bas Intrants'.

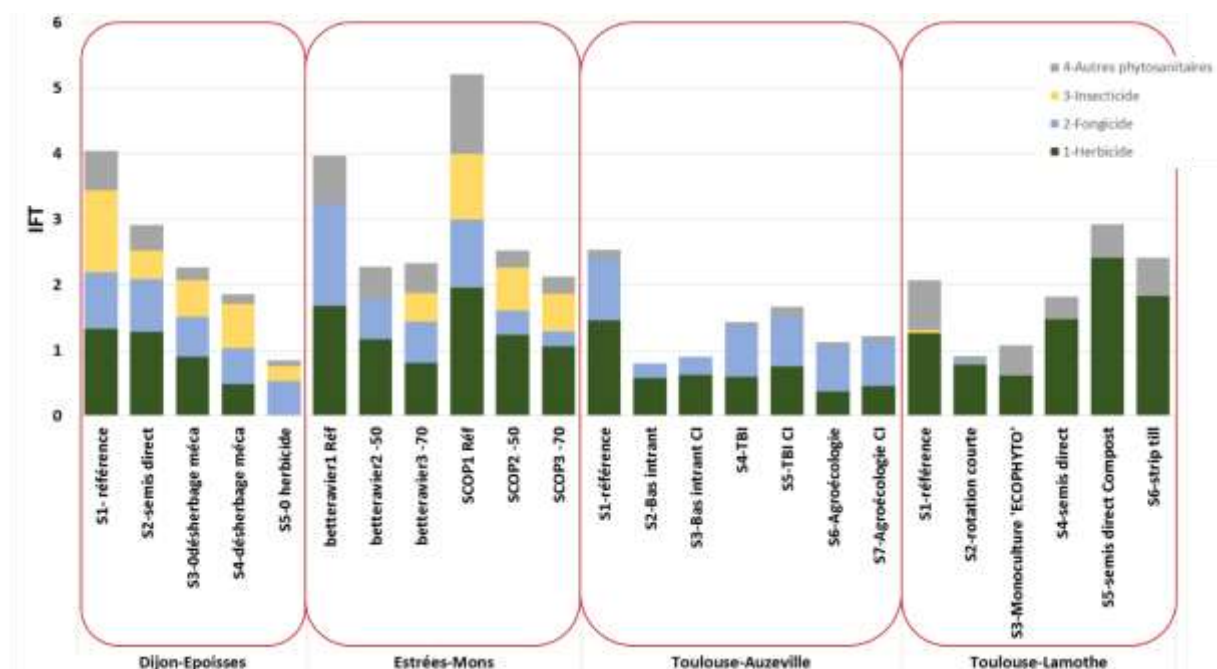


Figure 1 : Niveau d'IFT moyen des systèmes de culture testés sur les quatre sites, sur la période 2012-2016

A Toulouse-Auzeville, les pesticides hors-herbicides sont essentiellement des fongicides, qui ont pu être fortement réduits dans le système 'Bas Intrants'. L'allongement de la rotation 'Bas Intrants' avec la culture du sorgho, où nous ne rencontrons pas ou peu de problèmes de maladie, a contribué fortement à cette diminution. En revanche les IFT-fongicides ont peu baissé dans les systèmes 'Très bas intrants' et 'Agroécologiques', du fait de l'insertion de féverole dans ces systèmes. En effet, la culture de féverole s'est montrée moins rustique que nous ne pensions, en culture pure ou associée. Il y a eu une forte pression fongique sur la durée du projet nécessitant l'application de fongicides. A Dijon-Epoisses, la cohérence des systèmes construits pour la gestion des adventices a permis de réduire également les fongicides, les insecticides et les anti-limaces. Les semis tardifs du blé avec des variétés peu sensibles aux maladies et une fertilisation modérée ont contribué à diminuer les besoins de fongicides, et les faux-semis répétés contribuent à limiter la pression des limaces. En revanche, les traitements insecticides ont été encore nombreux sur colza, qui heureusement revient moins souvent dans la rotation dans les systèmes prototypes que dans le système de référence. A Toulouse-Lamothé, la lutte biologique a été généralisée pour maîtriser la pyrale du maïs lors des années d'attaque. Les principaux pesticides hors-herbicides sont des antilimaces qui ont été bien réduits dans les systèmes prototypes, notamment remplacés par du phosphate-ferrique (considéré comme biocontrôle, donc non comptabilisé dans l'IFT). A Estrées-Mons, les fongicides et les insecticides ont été également bien réduits, avec les mêmes leviers d'action qu'à Dijon-Epoisses.

2.2 Maîtrise de la flore adventice

2.2.1 A Dijon-Epoisses

Sur les 17 années d'expérimentation, la densité de la flore adventice et sa biomasse sont toujours supérieures dans les systèmes à faible usage d'herbicides, par rapport au système de référence. Pour autant, on n'observe aucune explosion démographique dans aucun de ces systèmes. Même si la densité d'adventices levées (comptée avant désherbage) tend à augmenter au cours du temps en S3 et S5, la densité après désherbage est partout restée stable dans le temps, indiquant que la flore est contrôlée grâce à la combinaison du préventif et du curatif (cf. par exemple système S4, Figure 2). Sur

plusieurs parcelles du dispositif, le vulpin, après avoir disparu durablement alors même que les anti-graminées n'étaient quasi jamais utilisés, s'est développé de façon inquiétante de 2012 à 2014, probablement en raison de la conjonction de deux facteurs : (i) une météo très particulière pendant l'hiver 2012 (coup de froid violent affectant sévèrement les céréales, laissant beaucoup de lumière pour des levées de vulpin au début du printemps), et (ii) l'adoption pendant quelques années de semis en combiné avec une herse rotative travaillant le sol trop profond, remontant le jour du semis des semences de vulpin en position favorable pour infester la céréale. Avec le retour du semis 'en solo', associé à un travail du sol très superficiel, le vulpin a été de nouveau partout maîtrisé, avec très peu, voire pas, d'herbicides anti-graminées.

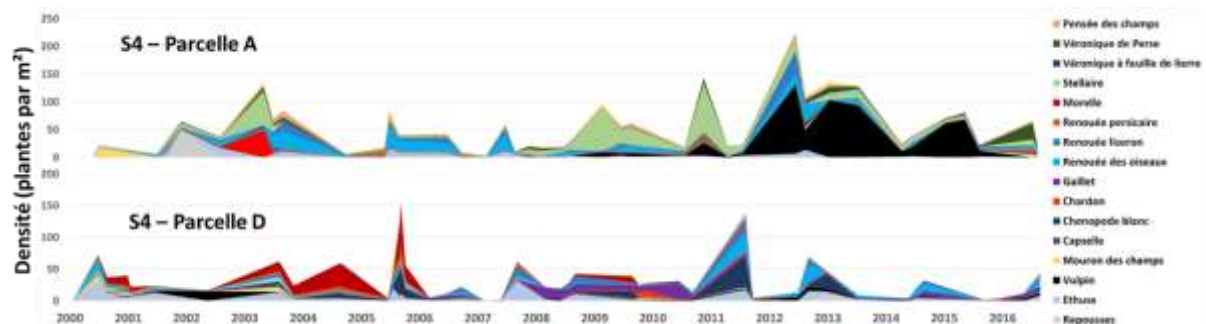


Figure 2 : Evolution des densités observées par espèce adventice au cours des 17 années d'expérimentation, sur les deux parcelles du système S4 'Protection Intégrée avec désherbage mécanique' à Dijon-Epoisses

Il est toujours difficile d'estimer les pertes de rendement imputables aux adventices. La biomasse adventice, exprimée en relatif par rapport à la biomasse totale 'culture + adventices' pendant la période de croissance forte du couvert végétal, peut être considérée comme un indicateur approximatif de ces pertes de rendement. A l'échelle du système de culture, sur l'ensemble des cultures de la succession, ce rapport de biomasse est resté faible dans les systèmes S3 et S4, inférieur à 3%, dans les $\frac{3}{4}$ des cultures (Figure 3). Dans les blés, ce rapport est resté quasi toujours inférieur à 3% dans tous les systèmes (y compris le système sans herbicide), suggérant des pertes de rendement minimales. Il est parfois plus élevé dans les colzas des systèmes S2 et S3, systèmes où le colza a été fréquemment implanté avec des légumineuses compagnes (lentille, féverole, vesce), dont la biomasse a été comptabilisée avec les adventices, et qui n'ont pas toujours gelé en hiver, contrairement à ce qui était prévu. Si ces plantes compagnes ont parfois maintenu des biomasses de l'ordre de 8 à 23%, et possiblement engendré des pertes de rendement du même ordre de grandeur, ces pertes de rendement doivent être considérées plutôt comme un effet du levier technique 'plantes compagnes' (pas toujours parfaitement maîtrisé) que comme une conséquence d'une perte de contrôle de la flore adventice.

La longue durée de l'expérimentation a permis de mettre en évidence des évolutions de flore. Le système S2 en semis direct a favorisé des graminées (panic, vulpin), des vivaces (liseron, pissenlit) et des espèces à dissémination anémophile (sénéçon commun, laitron, lapsane commune). Les deux systèmes à moindre usage d'herbicides (S3 et S4) ont favorisé des espèces habituellement bien maîtrisées par les herbicides (stellaire, chardon) et des dicotylédones printanières ou estivales (renouées, morelle, chénopode). Les deux systèmes avec travail du sol les plus dépendants des herbicides (S1 et S3) sont caractérisés par des espèces peu sensibles aux herbicides, mais plutôt peu compétitives (véroniques, pensées).

La confrontation des densités d'adventices avant et après désherbage (chimique et mécanique), en ne considérant que les espèces levées au moment du désherbage, permet d'estimer l'efficacité du désherbage curatif, et de la comparer entre les systèmes (avec une tendance à la sous-estimation).

Toutes cultures confondues, cette efficacité est logiquement plutôt moins bonne dans les systèmes à usage modéré d'herbicides (de 58 à 69% d'efficacité estimée) que dans le système de référence (78%). En colza, l'association de la houe rotative, de la herse étrille et du binage, confère une bonne efficacité de désherbage curatif dans les systèmes S4 et S5, de l'ordre de 78% en moyenne.

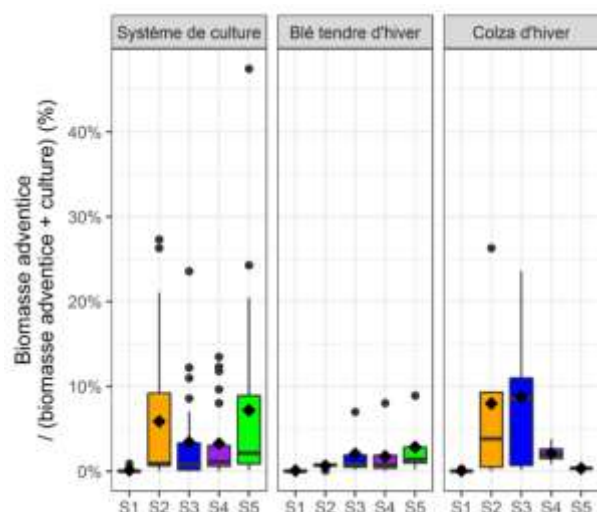


Figure 3 : Distribution des rapports de biomasse (adventices / adventices + culture) mesurées aux alentours de la floraison de la culture, sur les cinq systèmes de culture au cours des 17 années d'expérimentation à Dijon-Epoisses. Distribution sur l'ensemble des cultures de la rotation (à gauche), uniquement sur le blé (au milieu) et sur le colza (à droite). Dans les colzas, les plantes compagnes semées dans le colza des systèmes S2 et S3 sont comptabilisées avec les adventices.

2.2.2 A Estrées-Mons

Malgré les réductions significatives d'herbicides, la flore adventice est également bien maîtrisée à Estrées-Mons pour l'ensemble des systèmes alternatifs. Les densités restent également stables dans le temps, que ce soit dans les systèmes betteraviers (avec labour) (Figure 4) ou dans les systèmes 'SCOP' (sans labour), et ce malgré une infestation initiale d'*Agrostis jouet-du-vent* très forte. Aujourd'hui les espèces les plus préoccupantes dans ce système sont le gaillet, qui se maintient, voire progresse malgré les leviers de gestion alternatifs mis en place, et le chiendent qui s'est répandu dans les parcelles depuis les bordures lors de la campagne 2017-2018. Par ailleurs, en système SCOP (sans labour), les techniques qui permettent de limiter le recours aux herbicides sont parfois réalisées en conditions limites de ressuyage et peuvent entraîner des problèmes à la culture en place ou à venir.

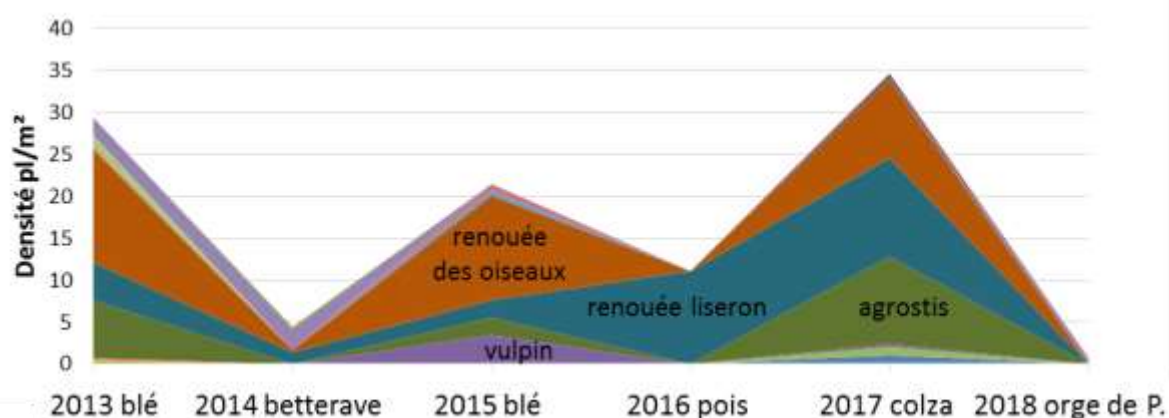


Figure 4 : Evolution des densités observées par espèce adventice de 2013 à 2018 sur une parcelle du système Betteravier ECOPHYTO 1 à Estrées-Mons. Dans ce système, hormis le pic de 2017 lié à une présence de plantes jeunes voire plantules sous le colza, on constate une stabilité de la flore adventice avec un IFT inférieur de 54% par rapport à la référence régionale.

2.2.3 A Toulouse-Auzeville

Dans les différents systèmes prototypes, la combinaison de la diversification des rotations avec le désherbage mécanique a permis de maîtriser globalement les infestations adventices sur la durée de l'expérimentation (2011-2016). Malgré un recours nettement moins important aux herbicides, on n'a pas constaté d'explosion démographique préjudiciable (Figure 5). La folle-avoine, espèce historiquement problématique sur le site, est en régression, les herbicides utilisés visant fréquemment cette espèce. En revanche, le chardon des champs, le ray-grass et la vulpie sont en progression. En désherbage curatif, l'efficacité du binage, éventuellement associé au traitement herbicide localisé sur le rang au semis ('herbisemis'), est bonne le plus souvent. En revanche, sur les cultures à faible écartement, les passages de herse étrille ont souvent été réalisés trop tard par manque de créneau météo au bon stade, ce qui a limité leur efficacité. Sur certaines parcelles certaines années, aucun désherbage mécanique n'a été possible. Le désherbage mécanique de pré-levée 'à l'aveugle' est encore mal maîtrisé.

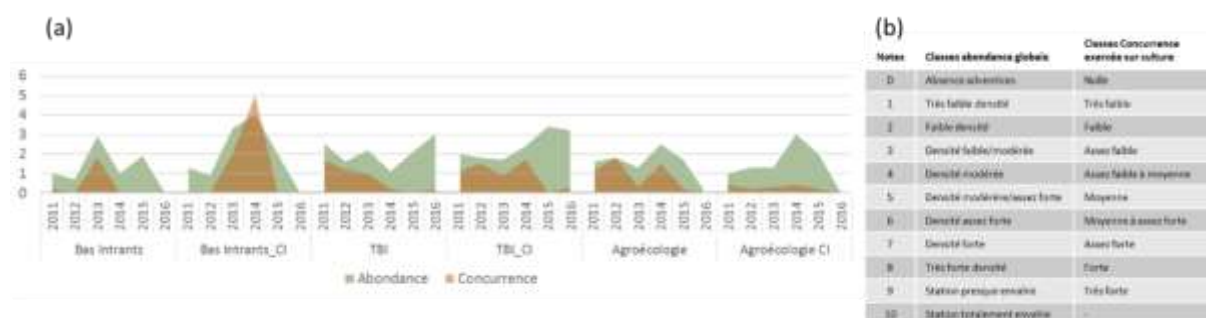


Figure 5 : (a) Evolution des notes d'abondance et de concurrence par systèmes de culture pendant les 6 années d'expérimentation ; (b) Tableau de correspondance entre les notes et leur signification.

2.2.4 A Toulouse-Lamothe

Comme à Dijon, la flore adventice est plus développée dans les systèmes alternatifs par rapport à la monoculture de maïs de référence, mais dans la plupart des systèmes, la flore est stable dans le temps à l'échelle de la rotation. La flore est maîtrisée dans le système S3 'ECOPHYTO' en monoculture de maïs (Figure 6) et dans le système S2 en rotation courte.

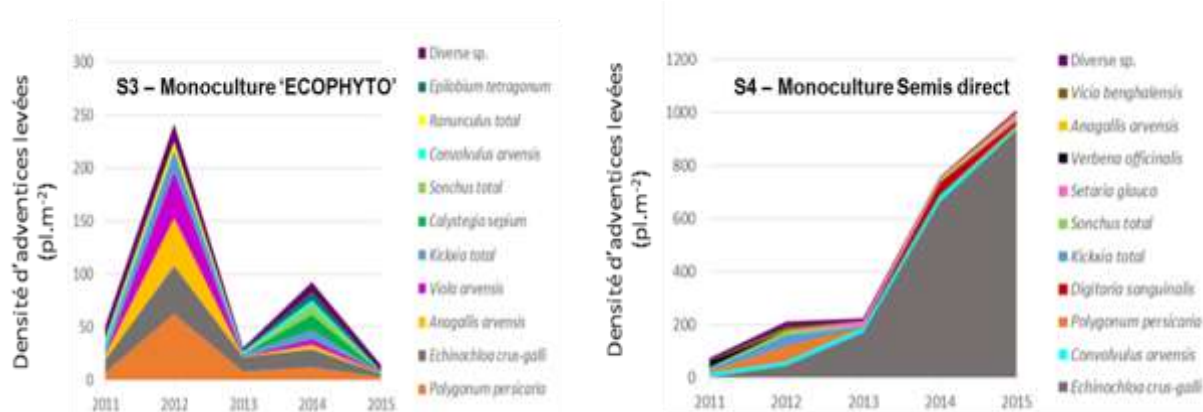


Figure 6 : Evolution du potentiel d'infestation (flore levée) sur deux systèmes prototypes de Toulouse-Lamothe.

En revanche, malgré la forte utilisation d'anti-graminées, les systèmes S4 et S5 en semis direct n'ont pas permis de maîtriser l'infestation de panic pied-de-coq (Figure 6), avec des potentiels d'infestation de 180 plantes par m² en 2012, 700 plantes levées par m² en 2014, 950 plantes par m² en 2015. Dans ces systèmes, la biomasse des adventices dans le maïs à maturité a pu être cinq fois plus forte que dans le

système de référence. Pour autant, même dans ce cas, la mesure du rendement en grain comparé à celui obtenu sur des placettes témoin maintenues sans adventices depuis la levée de la culture par du désherbage manuel a révélé un effet concurrentiel très limité, aucune perte de rendement imputable aux adventices n'ayant pu être mise en évidence (Adeux et al., 2017).

2.3 Performances économiques

Les calculs économiques ont été faits sur la base d'un scénario de prix des produits et des intrants correspondant à une moyenne sur la période 2005-2015 (Abgrall, 2017). Les charges par hectare sont le plus souvent très similaires dans les systèmes prototypes et les systèmes de référence correspondant. Les charges en produits phytosanitaires sont le plus souvent baissées, de même que les charges de fertilisation, mais les charges de mécanisation sont souvent augmentées, notamment dans les systèmes prototypes de Toulouse-Auzeville et Estrées-Mons. Les coûts de semences tendent à être plus élevés, en particulier dans les systèmes avec cultures intermédiaires et les systèmes en semis direct sous couvert. Le système où la baisse des charges est la plus importante est le système en rotation courte de Toulouse-Lamothe, en raison principalement de la forte baisse des coûts d'irrigation par rapport à la monoculture de maïs. La baisse des charges est également notable (bien que moins importante) dans les systèmes de Toulouse-Auzeville sans cultures intermédiaires, dans le système 'protection Intégrée avec désherbage mécanique' de Dijon-Epoisses, dans le système 'ECOPHYTO' de Toulouse-Lamothe, et dans le système 'SCOP ECOPHYTO 2' de Estrées-Mons.

La productivité des systèmes prototypes, exprimée en produit brut moyen sur la période 2012-2016, est souvent plus faible que celle du système de référence (Figure 7).

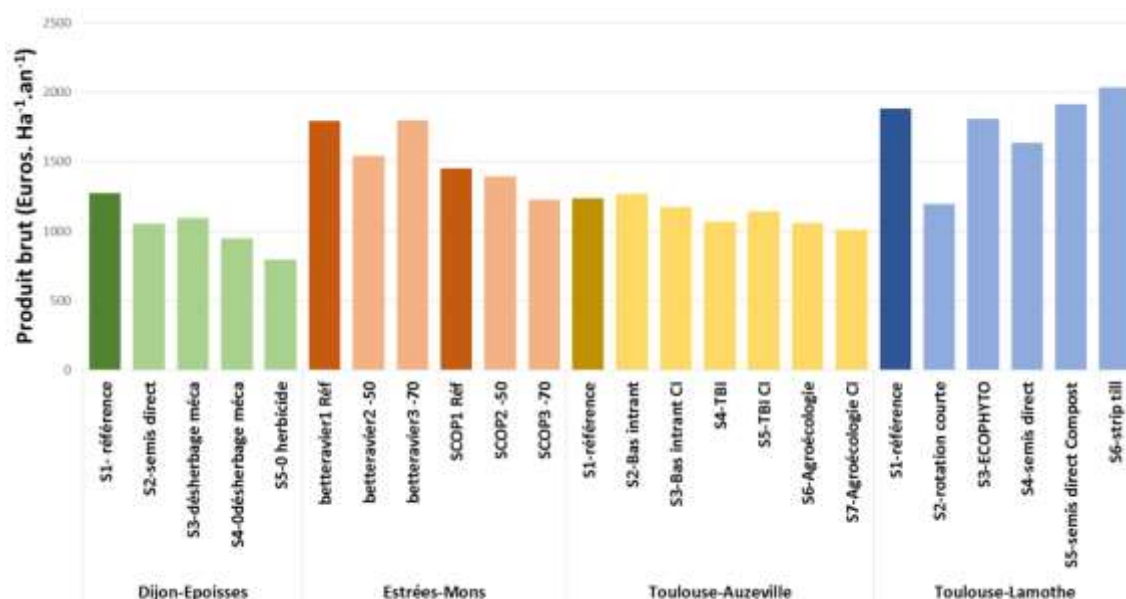


Figure 7 : Produits bruts moyens des systèmes de culture sur la période 2012-2016 (estimés pour un scénario de prix moyen sur la période 2005-2015).

Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette baisse : (i) la diversification des rotations, nécessaire pour baisser la pression des bioagresseurs, tend à introduire des cultures moins productives dans la région, ou dont les rendements sont plus aléatoires, ou moins bien maîtrisées techniquement ; (ii) le choix de variétés peu sensibles aux maladies (mais pas forcément les plus productives), le retard des dates de semis des céréales, ou la modération de la fertilisation pour réduire les pressions de maladies, sont également des leviers techniques qui tendent à baisser les rendements des cultures concernées. La baisse de productivité est très forte à Toulouse-Lamothe dans le cas de la rotation courte (introduction

de soja et de blé, beaucoup moins productifs que le maïs), et à Dijon-Epoisses dans le système sans herbicides, très impacté sur l'une des parcelles par des difficultés d'implantation d'une luzerne, pourtant nécessaire pour maîtriser des ronds de chardons en développement au cours des années précédentes. Certains systèmes prototypes permettent cependant de maintenir un niveau de productivité équivalent à la référence, notamment le système 'Bas Intrants' de Toulouse-Auzeville, les systèmes 'ECOPHYTO' (S3), semis direct avec matière organique (S5) et Strip Till (S6) de Toulouse-Lamothé, et le système Betteravier ECOPHYTO 2 à Estrées-Mons.

Dans l'ensemble, les baisses de charges peinent à compenser les baisses de productivité dans les systèmes prototypes, et les marges semi-nettes calculées sont souvent plus faibles pour les systèmes de culture les plus économes en pesticides (Figure 8).

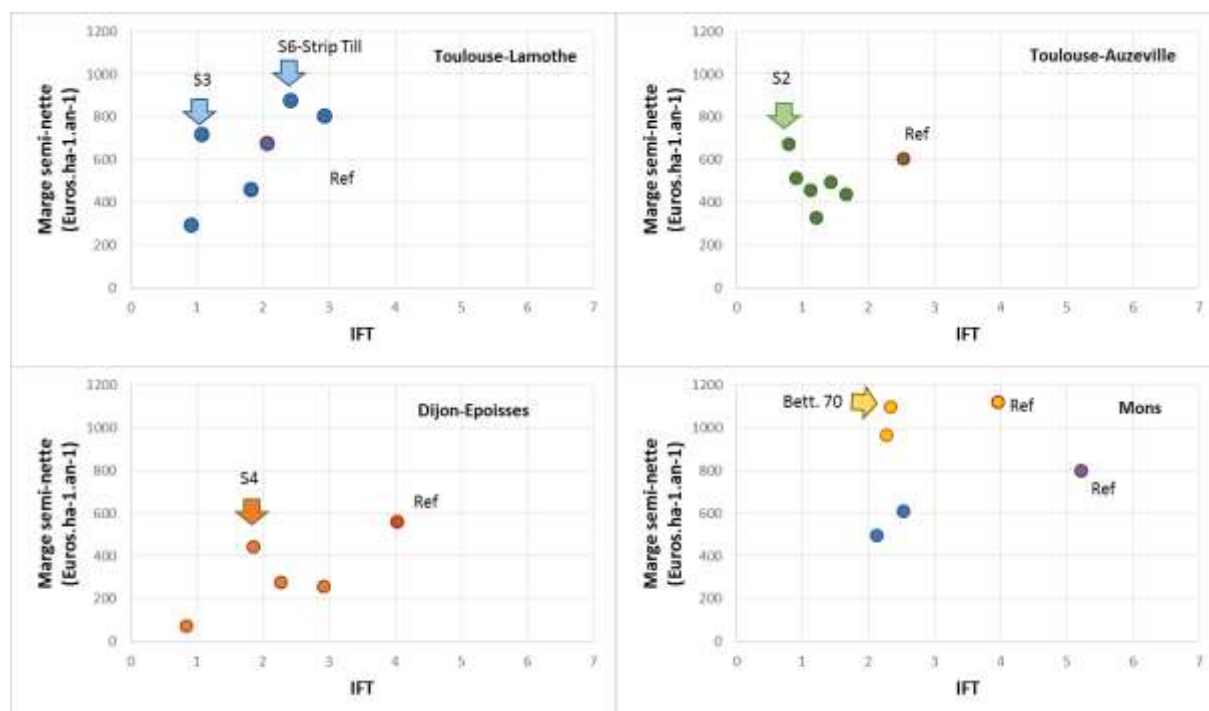


Figure 8 : Confrontation des IFT (hors traitement de semences) et des marges semi-nettes calculées pour la période 2012-2016, pour les systèmes testés sur les quatre sites du projet. Les systèmes de culture les plus prometteurs sont marqués par une flèche.

C'est particulièrement le cas à Dijon-Epoisses, à Estrées-Mons pour les systèmes SCOP 'céréaliers', et dans une moindre mesure à Toulouse-Auzeville. Pourtant, certains systèmes prometteurs permettent de concilier la baisse d'usage de pesticides avec une rentabilité économique équivalente à la référence : A Toulouse-Lamothé, le système 'ECOPHYTO' (S3) (Monoculture de maïs, avec labour tous les ans, implantation d'une culture intermédiaire, désherbage localisé sur le rang complété par du mécanique avec des binages, et lutte biologique contre la pyrale, Giuliano et al., 2016); à Toulouse-Auzeville, le système 'Bas intrants- Protection Intégrée sans Cultures intermédiaires', avec un IFT de 0.8 et une marge supérieure à la référence (rotation à base de blé dur et tournesol allongée avec du sorgho, labour tous les ans, faux-semis répétés pendant l'interculture, choix de variétés peu sensibles, modération de la fertilisation); à Estrées-Mons, le système Betteravier ECOPHYTO 2 (rotation diversifiée, labour occasionnel, faux semis, semis tardif des céréales, choix de variétés peu sensibles, fertilisation modérée, désherbage mécanique), qui divise presque l'IFT par 2 sans dégrader la marge par rapport à la référence (mais attention, l'évaluation économique sur la période 2012-2016 n'intègre pas encore les deux années de luzerne prévues dans la rotation de ce système, culture importante pour baisser les IFT mais potentiellement à rentabilité économique moindre) ; et dans une moindre mesure le système 'Protection Intégrée avec désherbage mécanique' (S4) à Dijon-Epoisses (rotation diversifiée,

labour occasionnel, faux semis, semis tardif des céréales, choix de variétés peu sensibles, fertilisation modérée, désherbage mécanique), pour lequel le différentiel de marge est relativement faible (de l'ordre d'une centaine d'euros, soit l'équivalent des mesures de soutien public aux pratiques économes en phytosanitaires) au regard de la forte baisse d'IFT.

2.4 Transferts de pesticides dans les eaux de percolation

Sur les centaines d'échantillons d'eau collectée par les plaques lysimétriques des trois sites instrumentés, la concentration maximale en substances actives phytosanitaires mesurée sur chacun des prototypes testés varie considérablement : à Dijon-Epoisses, de 0,04 µg/l en système zéro herbicides à 57 µg/l en système en Semis Direct Sous Couvert; à Toulouse-Lamothé, de 1,2 µg/l en système 'Rotation courte' à 29 µg/l en monoculture de maïs 'Semis Direct' ; à Toulouse-Auzeville de 0,6 µg/l en système 'Très Bas Intrants avec Cultures Intermédiaires' à 8,9 µg/l en système 'Très Bas Intrants'. La nature des substances transférées diffère en fonction des sites (Figure 9) : principalement bentazone à Dijon-Epoisses, principalement S-métolachlore à Toulouse-Auzeville, principalement S-métolachlore, mésotrione et nicosulfuron à Toulouse-Lamothé. Les quantités de substances transférées sont remarquablement les plus élevées dans les deux systèmes en semis direct, à Dijon-Epoisses et Toulouse-Lamothé, peut-être parce que la macro-bioporosité (créée par les racines des cultures intermédiaires et l'activité de la macrofaune du sol) génère des voies d'écoulement préférentielles vers la profondeur (comme souvent mentionné dans la littérature (Alletto et al., 2010)).

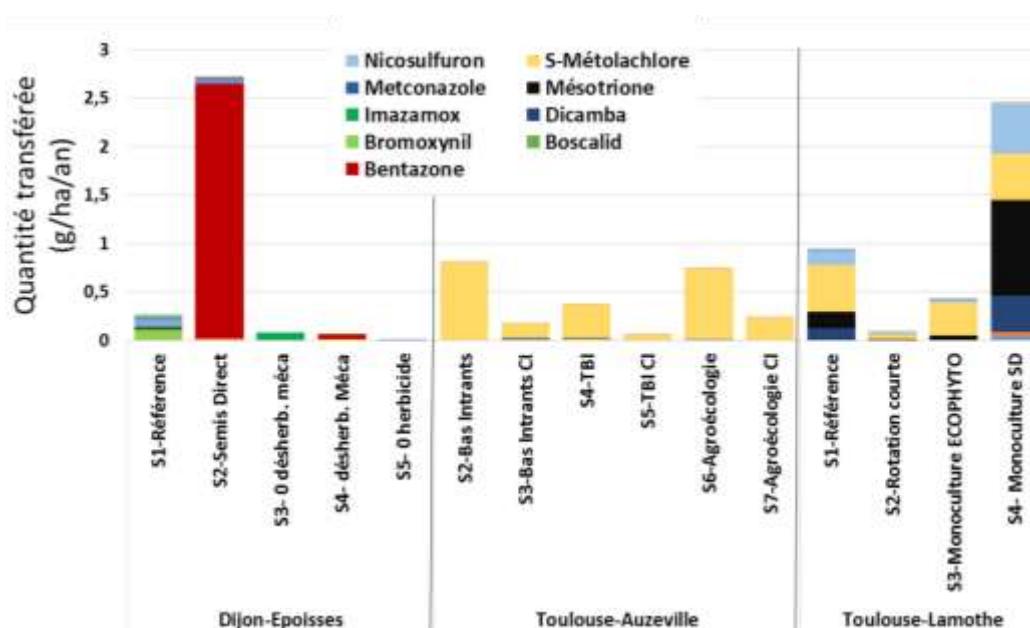


Figure 9 : Quantités moyennes de substances actives transférées sur les parcelles des trois sites instrumentés, sur la période 2013-2015.

Pour les systèmes avec travail du sol de Dijon-Epoisses et Toulouse-Lamothé, on observe une relation entre l'IFT moyen et la quantité de substances transférées (Figure 10). Selon ces observations, il y aurait donc bien un lien entre l'usage de pesticides et leur impact environnemental, considérés à l'échelle intégratrice du système de culture et pour un site donné, parce qu'en cumulant l'ensemble des molécules appliquées à l'échelle du système, on augmente la probabilité d'utiliser une molécule dont les risques de transfert sont élevés. Ce résultat est important, car ce lien entre usage et impact est souvent contesté, sur la base d'observations faites soit à l'échelle du traitement individuel, soit sur la base de résultats nationaux mélangeant des données de sites dont les propriétés physiques et hydrodynamiques sont très différentes.

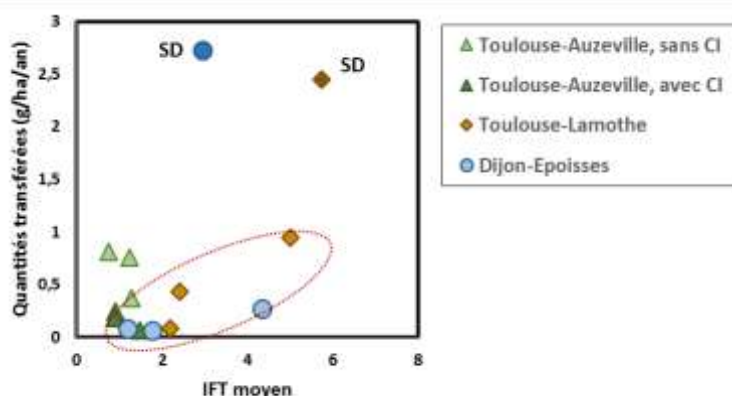


Figure 10 : Relation entre IFT moyen à l'échelle du système de culture sur la période 2013-2015, et quantité de substances actives transférées. SD : Systèmes en semis direct

A Toulouse-Auzeville, la gamme de variation des IFT est trop faible pour que cette relation IFT-impact puisse être observée. En revanche, les systèmes de Toulouse-Auzeville mettent clairement en évidence une tendance à la réduction des transferts sous l'effet des couverts d'interculture. On peut faire l'hypothèse que l'évapotranspiration due aux couverts végétaux réduit le drainage, et donc le transfert de pesticides (confirmant les résultats d'Alletto et al., 2012). De plus, les effets des résidus des couverts végétaux incorporés au sol sur la rétention et la dégradation des molécules de pesticides peuvent expliquer le moindre transfert dans les systèmes avec couverts d'interculture (Cassigneul et al., 2015).

Conclusions

Les quatre expérimentations du projet SYSTEM-ECO⁴ ont permis de montrer que les combinaisons de leviers techniques mobilisables en grandes cultures sont efficaces pour maîtriser la flore adventice, et de façon durable. Elles permettent de baisser de façon importante la dépendance aux herbicides et aux autres produits phytosanitaires, d'atteindre les objectifs du plan ECOPHYTO, et de baisser ainsi les quantités de substances actives transférées dans les eaux de drainage. Tous les systèmes testés ne permettent pas de maintenir les performances économiques au niveau des systèmes de référence, mais certaines options stratégiques permettent de concilier baisse d'IFT et rentabilité satisfaisante. La diversification des successions culturales, notamment par la diversification des périodes de semis, semble un levier technique incontournable dans les régions dominées par les céréales d'hiver. En revanche, cette diversification ne doit pas être systématiquement considérée comme un prérequis obligatoire : sur le site de Toulouse-Lamothe, dans un contexte de monoculture de maïs, c'est bien une monoculture de maïs conduite en bas intrants avec du désherbage mécanique qui semble le meilleur compromis pour concilier la baisse d'IFT avec des performances économiques. Ces exemples montrent que c'est bien une articulation de leviers adaptés au territoire qui doivent être pris en considération afin de réduire l'usage des pesticides tout en maintenant les performances du système.

En revanche, aucun des deux prototypes de systèmes fondés sur le semis direct ne se sont avérés satisfaisants : ils ont nécessité beaucoup d'herbicides pour maîtriser les adventices, ils sont caractérisés par des transferts importants de substances actives dans les eaux de drainage, et leurs performances économiques sont décevantes. Ces résultats ne veulent pas dire que le semis direct n'est pas compatible avec ECOPHYTO, mais d'autres règles de pilotage doivent être explorées pour réduire la dépendance aux herbicides de ce type de systèmes, par ailleurs souvent présentés comme « agroécologiques ».

Le travail en station expérimentale a permis de comparer des options stratégiques contrastées dans des contextes de production homogènes (ce qui facilite les comparaisons), et de prendre probablement plus de risque que ce qu'il est possible dans les fermes. Ces expérimentations ont été toutes les quatre abondamment visitées, par des agriculteurs, des groupes de fermes DEPHY, des conseillers, des étudiants, des politiques. Ces visiteurs sont venus se convaincre de l'efficacité des leviers techniques mobilisés. Il ne s'agit en aucun cas de diffuser des systèmes de culture « clefs-en-main », mais plutôt

de diffuser des principes de Protection Intégrée qui doivent être adaptés localement en fonction des spécificités de chaque contexte de production.

Enfin, les résultats des mesures de transfert de substances actives dans les eaux de percolation tendent à valider les choix politiques du plan ECOPHYTO, en montrant que la baisse des usages de pesticides est bien un moyen efficace pour baisser leurs impacts. Le projet SYSTEM-ECO⁴ apporte donc sa contribution à ce débat important pour l'avenir de l'agriculture en France.

Références bibliographiques

Abgrall M., 2017. Evaluation multicritère de systèmes innovants à faible usage de pesticides en réseau multisites. Mémoire UniLaSalle, 56 pages.

Adeux G., Giuliano S., Cordeau S., Savoie J.M., Alletto L., 2017. Low-Input Maize-Based Cropping Systems Implementing IWM Match Conventional Maize Monoculture Productivity and Weed Control. *Agriculture*, 7, 74 (doi:10.3390/agriculture7090074).

Alletto L., Coquet Y., Benoit P., Heddadj D., Barriuso E., 2010. Tillage management effects on pesticide fate in soils. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 30, 367-400.

Alletto L., Benoit P., Justes E., Coquet Y., 2012. Tillage and fallow period management effects on the fate of the herbicide isoxaflutole in an irrigated continuous-maize field. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 153, 40–49.

Cassigneul A., Alletto L., Benoit P., Bergheaud V., Etiévant V., Dumény V., Le Gac AL., Chuet D., Rumpel C., Justes E., 2015. Nature and decomposition degree of cover crops influence pesticide sorption: Quantification and modelling. *Chemosphere* 119, 1007–1014.

Giuliano S., Ryan M.R., Rametti G., Perdrieux F., Justes E., Alletto L., 2016. Low-input cropping systems to reduce input dependency and environmental impacts in maize production: a multicriteria assessment. *European Journal of Agronomy*, 76, 160-175

Lammoglia S.K., Moeys J., Barriuso E., Larsbo M., Marín-Benito J.M., Justes E., Alletto L., Ubertosi M., Nicolardot B., Munier-Jolain N., Mamy L., 2017. Sequential use of the STICS crop model and of the MACRO pesticide fate model to simulate pesticides leaching in cropping systems. *Environmental Science and Pollution Research* 24, 6895-6909.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0).



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « *Innovations Agronomiques* », la date de sa publication, et son URL ou DOI).